



仿真科学与技术及其军事应用丛书

Warfighting Parallel  
Simulation

# 作战并行仿真

杨学会 黄俊卿 谭亚新 郭齐胜 等编著



国防工业出版社  
National Defense Industry Press



仿真科学与技术及其军事应用丛书

---

总装备部科技创新人才团队专项经费资助

# 作战并行仿真

杨学会 黄俊卿 谭亚新 郭齐胜 范锐 编著

## 内 容 简 介

作战并行仿真可以支持更大的仿真规模,提高仿真速度,以支撑作战训练、作战方案论证、装备体系论证中的仿真研究。

本书介绍了作战并行仿真实现的理论、方法和技术基础,内容包括:作战并行仿真的基础理论、作战并行仿真支撑环境、作战并行仿真实现的方法和技术(仿真任务分割、仿真任务分配、仿真系统体系结构)、作战并行仿真应用实例与作战并行仿真发展趋势等内容。

本书可作为高等院校有关专业本科生和研究生的教材或参考书,也可作为科研人员和工程技术人员的技术参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

作战并行仿真/杨学会等编著. —北京:国防工业出版社,2014. 1

(仿真科学与技术及其军事应用丛书)

ISBN 978 - 7 - 118 - 08778 - 9

I. ①作... II. ①杨... III. ①作战指挥自动化 - 计算机仿真 IV. ①E141. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 096224 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

\*

开本 710 × 960 1/16 印张 18 字数 307 千字

2014 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 45.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

## 丛书编写委员会

主任委员 郭齐胜

副主任委员 徐享忠 杨瑞平

委 员 (按姓氏音序排列)

曹晓东	曹裕华	丁 艳	邓桂龙	邓红艳
董冬梅	董志明	范 锐	郭齐胜	黄俊卿
黄玺璜	黄一斌	贾庆忠	姜桂河	康祖云
李 雄	李 岩	李宏权	李巧丽	李永红
刘 欣	刘永红	罗小明	马亚龙	孟秀云
闵华侨	穆 歌	单家元	谭亚新	汤再江
王 勃	王 浩	王 娜	王 伟	王杏林
徐丙立	徐豪华	徐享忠	杨 娟	杨瑞平
杨学会	于永涛	张 伟	张立民	张小超
赵 倩				

# 总序

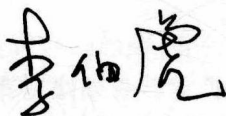
---

为了满足仿真工程学科建设与人才培养的需求,郭齐胜教授策划在国防工业出版社出版了国内第一套成体系的系统仿真丛书——“系统建模与仿真及其军事应用系列丛书”。该丛书在全国得到了广泛的应用,取得了显著的社会效益,对推动系统建模与仿真技术的发展发挥了重要作用。

系统建模与仿真技术在系统科学、控制科学、计算机科学、管理科学等学科的交叉、综合中孕育和发展而成为仿真科学与技术学科。针对仿真科学与技术学科知识更新快的特点,郭齐胜教授组织多家高校和科研院所的专家对“系统建模与仿真及其军事应用系列丛书”进行扩充和修订,形成了“仿真科学与技术及其军事应用丛书”。该丛书共 19 本,分为“理论基础—应用基础—应用技术—应用”4 个层次,系统、全面地介绍了仿真科学与技术的理论、方法和应用,体系科学完整,内容新颖系统,军事特色鲜明,必将对仿真科学与技术学科的建设与发展起到积极的推动作用。

中国工程院院士

中国系统仿真学会理事长



2011 年 10 月

# 序言

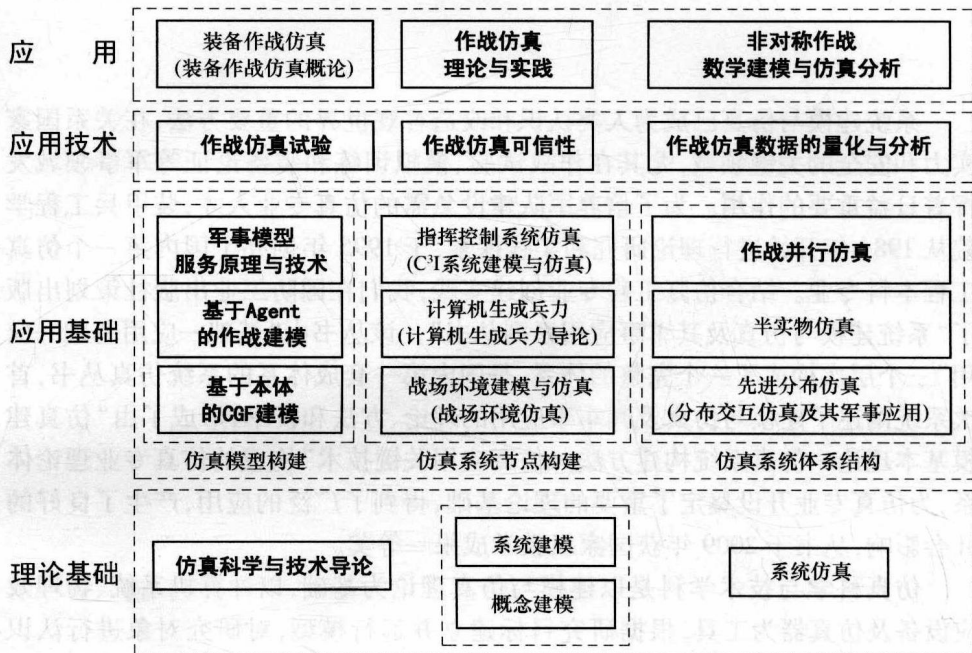
---

系统建模与仿真已成为人类认识和改造客观世界的重要方法,在关系国家实力和安全的关键领域,尤其在作战试验、模拟训练和装备论证等军事领域发挥着日益重要的作用。为了培养军队建设急需的仿真专业人才,装甲兵工程学院从1984年开始进行理论研究和实践探索,于1995年创办了国内第一个仿真工程本科专业。结合仿真工程专业创建实践,我们在国防工业出版社策划出版了“系统建模与仿真及其军事应用系列丛书”。该丛书由“基础—应用基础—应用”三个层次构成了一个完整的体系,是国内第一套成体系的系统仿真丛书,首次系统阐述了建模与仿真及其军事应用的理论、方法和技术,形成了由“仿真建模基本理论—仿真系统构建方法—仿真应用关键技术”构成的仿真专业理论体系,为仿真专业开设奠定了重要的理论基础,得到了广泛的应用,产生了良好的社会影响,丛书于2009年获国家级教学成果一等奖。

仿真科学与技术学科是以建模与仿真实论为基础,以计算机系统、物理效应设备及仿真器为工具,根据研究目标建立并运行模型,对研究对象进行认识与改造的一门综合性、交叉性学科,并在各学科各行业的实际应用中不断成长,得到了长足发展。经过5年多的酝酿和论证,中国系统仿真学会2009年建议在我国高等教育学科目录中设置“仿真科学与技术”一级学科;教育部公布的2010年高考招生专业中,仿真科学与技术专业成为23个首次设立的新专业之一。

最近几年,仿真技术出现了与相关技术加速融合的趋势,并行仿真、网格仿真及云仿真等先进分布仿真成为研究热点;军事模型服务与管理、指挥控制系统仿真、作战仿真试验、装备作战仿真、非对称作战仿真以及作战仿真可信性等重要议题越来越受到关注。而“系统建模与仿真及其军事应用系列丛书”中出版最早的距今已有8年多时间,出版最近的距今也有5年时间,部分内容需要更新。因此,为满足仿真科学与技术学科建设和人才培养的需求,适应仿真科学与技术快速发展的形势,反映仿真科学与技术的最新研究进展,我们组织国内8家高校和科研院所的专家,按照“继承和发扬原有特色和优点,转化和集成科研学术成果,规范和统一编写体例”的原则,采用“理论基础—应用基础—应

用技术—应用”的编写体系,保留了原“系列丛书”中除《装备效能评估概论》外的其余9本,对内容进行全面修订并修改了5本书的书名,另增加了10本新书,形成“仿真科学与技术及其军事应用丛书”,该丛书体系结构如下图所示(图中粗体表示新增加的图书,括号中为修改前原丛书中的书名):



中国工程院院士、中国系统仿真学会理事长李伯虎教授在百忙之中为本丛书作序。丛书的出版还得到了中国系统仿真学会副秘书长、中国自动化学会系统仿真专业委员会副主任委员、《计算机仿真》杂志社社长兼主编吴连伟教授,空军指挥学院作战模拟中心毕长剑教授,装甲兵工程学院训练部副部长王树礼教授、装备指挥与管理系副主任王洪炜副教授和国防工业出版社相关领导的关心、支持和帮助,在此一并表示衷心的感谢!

仿真科学与技术涉及多学科知识,而且发展非常迅速,加之作者理论基础与专业知识有限,丛书中疏漏之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

郭齐胜  
2012年3月

# 总序


《系统建模与仿真及其军事应用系列丛书》

仿真技术具有安全性、经济性和可重复性等特点,已成为继理论研究、科学实验之后第三种科学研究的有力手段。仿真科学是在现代科学技术发展的基础上形成的交叉科学。目前,国内出版的仿真技术方面的著作较多,但系统的仿真科学与技术丛书还很少。郭齐胜教授主编的“系统建模与仿真及其军事应用系列丛书”在这方面作了有益的尝试。

该丛书分为基础、应用基础和应用三个层次,由《概念建模》、《系统建模》、《半实物仿真》、《系统仿真》、《战场环境仿真》、《C<sup>3</sup>I 系统建模与仿真》、《计算机生成兵力导论》、《分布交互仿真及其军事应用》、《装备效能评估概论》、《装备作战仿真概论》10本组成,系统、全面地介绍了系统建模与仿真的理论、方法和应用,既有作者多年来的教学和科研成果,又反映了仿真科学与技术的前沿动态,体系完整,内容丰富,综合性强,注重实际应用。该丛书出版前已在装甲兵工程学院等高校的本科生和研究生中应用过多轮,适合作为仿真科学与技术方面的教材,也可作为广大科技和工程技术人员的参考书。

相信该丛书的出版会对仿真科学与技术学科的发展起到积极的推动作用。

中国工程院院士



2005年3月27日



# 序言

《系统建模与仿真及其军事应用系列丛书》

仿真科学与技术具有广阔的应用前景,正在向一级学科方向发展。仿真科技人才的需求也在日益增大。目前很多高校招收仿真方向的硕士和博士研究生,军队院校中还设立了仿真工程本科专业。仿真学科的发展和仿真专业人才的培养都在呼唤成体系的仿真技术丛书的出版。目前,仿真方面的图书较多,但成体系的丛书极少。因此,我们编写了“系统建模与仿真及其军事应用系列丛书”,旨在满足有关专业本科生和研究生的教学需要,同时也可供仿真科学与技术工作者和有关工程技术人员参考。

本丛书是作者在装甲兵工程学院及北京理工大学多年教学和科研的基础上,系统总结而写成的,绝大部分初稿已在装甲兵工程学院和北京理工大学相关专业本科生和研究生中试用过。作者注重丛书的系统性,在保持每本书相对独立的前提下,尽可能地减少不同书中内容的重复。

本丛书部分得到了总装备部“1153”人才工程和军队“2110工程”重点建设学科专业领域经费的资助。中国工程院院士、中国系统仿真学会副理事长、《系统仿真学报》编委会副主任、总装备部仿真技术专业组特邀专家、哈尔滨工业大学王子才教授在百忙之中为本丛书作序。丛书的编写和出版得到了中国系统仿真学会副秘书长、中国自动化学会系统仿真专业委员会副主任委员、《计算机仿真》杂志社社长兼主编吴连伟教授,以及装甲兵工程学院训练部副部长王树礼教授、学科学位处处长谢刚副教授、招生培养处处长钟孟春副教授、装备指挥与管理系主任王凯教授、政委范九廷大校和国防工业出版社的关心、支持和帮助。作者借鉴或直接引用了有关专家的论文和著作。在此一并表示衷心的感谢!

由于水平和时间所限,不妥之处在所难免,欢迎批评指正。

郭齐胜

2005年10月

# 前言

---

有关并行仿真的研究成果非常丰富,但要么基础条件门槛比较高,基于高性能计算机;要么技术门槛比较高,基于并行计算或并行仿真引擎,读者很难搞懂,更难实现并行仿真。

随着多核技术的普及,个人计算机都将成为并行计算机,并行计算的研究如火如荼,不管是从硬件上、软件上,还是从思想上,都代表着 IT 行业的发展方向。在单核时代,并行计算被限制在实验室内的高性能计算机上,分布式计算则受网络通信技术的限制,停留在非常专业的范围内。

当硬件条件的区别日渐模糊时,并行计算的领域更加广泛,现在哪台计算机不是并行计算机呢?但可惜,并不是所有的计算都是并行计算,这需要从并行的角度来设计、应用软件。

受军事应用需求推动,分布交互式仿真在作战仿真中一直占有十分显赫的地位,发挥着重要的作用。从仿真世界事件并发的本质看,分布交互式仿真是并行仿真的一种,因此,分布交互式仿真理论、方法和技术的发展也不断推动着并行仿真的发展。

在仿真领域,多个实体活动的时间并行性,使仿真系统最有可能、也最应该回归“并行”的本质,并将“并行”与硬件结构松绑;并行计算应该从概念上回归其本质,即使是和计算机硬件结构特点绑定,在多核并行一统天下的今天,并行计算终究回归正统。

本书由杨学会编写,黄俊卿、谭亚新和郭齐胜审校。本书编写过程中参考或直接引用了国内外有关文献,并得到了总装备部科技创新人才团队专项经费资助出版,在此一并表示感谢。

书中不妥之处在所难免,欢迎批评指正。

作者

2013 年 2 月

# 目 录

---

<b>第 1 章 绪论</b>	<b>001</b>
1.1 作战仿真	002
1.1.1 作战的特点	002
1.1.2 作战发展趋势	002
1.1.3 作战仿真的特点	003
1.1.4 作战仿真系统的发展趋势	005
1.2 基于高性能计算的仿真	008
1.2.1 高性能计算技术	008
1.2.2 基于高性能计算的仿真技术	016
1.2.3 高性能仿真技术的特点	017
1.3 作战并行仿真及其现状	019
1.3.1 作战并行仿真的概念及特点	019
1.3.2 作战并行仿真应用现状	025
参考文献	029
<b>第 2 章 并行仿真基础</b>	<b>031</b>
2.1 分布式计算	031
2.1.1 概念	031
2.1.2 分布式计算的工作原理	032
2.2 并行计算	034
2.2.1 并行计算的层次	034
2.2.2 并行计算设计原则及方法	034
2.2.3 并行算法的设计过程	035
2.2.4 并行计算模型	038
2.2.5 性能度量	045
2.2.6 并行加速比定律	047

2.3	分布式仿真 .....	049
2.3.1	DIS 协议 .....	049
2.3.2	聚集仿真协议 ALSP .....	050
2.3.3	高层体系结构 HLA .....	050
2.3.4	DIS、ALSP 和 HLA 的比较 .....	052
2.4	并行仿真 .....	052
2.4.1	并行仿真与分布式仿真的区别 .....	053
2.4.2	并行仿真与串行仿真的区别 .....	054
2.5	并行仿真计算模型及其度量 .....	054
2.5.1	并行仿真计算模型 .....	055
2.5.2	作战系统的并行性度量 .....	057
2.5.3	作战仿真系统的并行性度量 .....	057
2.5.4	并行仿真的加速比和效率 .....	059
2.5.5	并行仿真对模型及仿真系统的要求 .....	062
2.5.6	仿真任务划分 .....	063
	参考文献 .....	064
<b>第 3 章 并行仿真支撑环境</b> .....		<b>066</b>
3.1	硬件支撑平台 .....	067
3.1.1	并行计算机与分布式计算机 .....	067
3.1.2	对称多处理机 .....	073
3.1.3	大规模并行处理机 .....	075
3.1.4	工作站机群 .....	077
3.1.5	GPU 的通用计算 .....	082
3.2	软件支撑环境 .....	084
3.2.1	典型的分布式计算技术 .....	084
3.2.2	并行与分布式计算中间件 .....	098
3.2.3	分布式仿真通信中间件 .....	104
	参考文献 .....	118
<b>第 4 章 作战并行仿真基本原理</b> .....		<b>119</b>
4.1	连续系统并行仿真 .....	120
4.1.1	连续系统并行仿真的特点 .....	120

4.1.2	数据复制方式 .....	122
4.1.3	空间分解方式 .....	123
4.2	离散事件系统 .....	124
4.2.1	仿真时间 .....	124
4.2.2	串并行关系事件与因果关系事件 .....	124
4.2.3	离散事件仿真的方法 .....	126
4.3	并行离散事件仿真 .....	130
4.3.1	仿真的驱动方式 .....	131
4.3.2	并行离散事件仿真原理简介 .....	132
4.3.3	并行离散事件仿真的同步策略 .....	132
	参考文献 .....	137
<b>第5章 作战并行仿真任务分割方法</b> .....		<b>138</b>
5.1	并行的世界观 .....	138
5.2	完全并行机制 .....	139
5.2.1	作战系统的并行性 .....	139
5.2.2	作战仿真系统的并行性 .....	140
5.2.3	并行仿真程序的分割模式 .....	142
5.2.4	问题及挑战 .....	142
5.3	基于无向图的任务分割方法 .....	143
5.3.1	假设条件 .....	143
5.3.2	基于无向图的分割算法 .....	144
5.4	作战并行仿真任务描述方法 .....	144
5.4.1	面向功能模块的并行性描述 .....	144
5.4.2	面向作战编成的并行性描述 .....	148
5.4.3	面向作战地域并行仿真的问题描述 .....	150
5.5	作战并行仿真任务分割原则 .....	152
5.5.1	面向功能模块并行仿真实实现的方法 .....	152
5.5.2	面向作战编成并行仿真实实现的方法 .....	154
5.5.3	面向作战地域并行仿真实实现的方法 .....	157
5.6	作战并行仿真任务分割方法 .....	160
5.6.1	功能模块分割方法 .....	160
5.6.2	面向作战编成并行仿真任务分割方法 .....	162

5.6.3	面向作战地域并行仿真任务分割方法	164
	参考文献	167
<b>第6章</b>	<b>作战并行仿真任务分配方法</b>	<b>168</b>
6.1	作战并行仿真任务分配的特点及方法分类	168
6.1.1	作战并行仿真任务分配的特点及分类	168
6.1.2	作战并行仿真任务分配方法的分类	169
6.2	作战并行仿真任务合并方法	171
6.2.1	功能模块合并方法	171
6.2.2	面向作战编成并行仿真任务合并方法	176
6.2.3	面向作战地域并行仿真任务合并方法	180
6.3	作战并行仿真任务分配算法	181
6.3.1	基本的负载平衡算法	181
6.3.2	静态负载平衡算法	183
6.3.3	动态负载平衡算法	185
	参考文献	186
<b>第7章</b>	<b>作战并行仿真系统体系结构</b>	<b>187</b>
7.1	作战并行仿真系统体系结构的构建原则	187
7.1.1	相关概念	188
7.1.2	设计原则	190
7.2	作战并行仿真任务体系	190
7.2.1	作战编成	191
7.2.2	作战地域	194
7.2.3	功能模块	197
7.3	作战并行仿真系统功能设计	204
7.3.1	并行仿真集成功能	204
7.3.2	并行仿真通信功能	204
7.3.3	并行仿真管理功能	205
7.3.4	并行仿真任务分配功能	206
7.4	作战并行仿真系统的使用流程	207
7.5	作战并行仿真系统结构设计	208
7.5.1	作战并行仿真集成软件	208

7.5.2	并行仿真运行与管理软件 .....	209
7.5.3	并行仿真任务分配软件 .....	209
7.6	作战并行仿真系统实现方法 .....	210
7.6.1	进程框架 .....	211
7.6.2	任务分配 .....	212
7.6.3	管理控制 .....	213
	参考文献 .....	216
<b>第 8 章</b>	<b>作战并行仿真应用</b> .....	<b>217</b>
8.1	基于 OpenMP 的坦克连排对抗仿真 .....	217
8.1.1	坦克连排对抗仿真模型 .....	217
8.1.2	基于 OpenMP 的程序设计与实现 .....	220
8.1.3	仿真系统模块设计与实现 .....	224
8.1.4	仿真结果分析 .....	226
8.2	基于功能并行的陆军战役级装备作战并行仿真系统 .....	228
8.2.1	某陆军战役级装备作战仿真系统的组成 .....	229
8.2.2	装备作战并行仿真的实现 .....	233
8.2.3	装备作战仿真系统的并行性能分析 .....	235
8.2.4	装备作战仿真系统的并行性能改进分析 .....	240
8.3	通用型陆军作战并行仿真系统 .....	242
8.3.1	硬件体系结构 .....	242
8.3.2	并行仿真系统 .....	244
8.3.3	并行仿真交互通信设计 .....	248
8.3.4	交互通信监测与记录 .....	249
<b>第 9 章</b>	<b>作战并行仿真的发展趋势</b> .....	<b>251</b>
9.1	并行计算硬件环境 .....	251
9.1.1	多核处理器 .....	251
9.1.2	CPU + GPU 异构型计算环境 .....	254
9.2	并行仿真体系结构 .....	255
9.2.1	云仿真 .....	255
9.2.2	普适仿真 .....	256
9.3	作战并行仿真支撑软件 .....	257

9.3.1	XMSF .....	257
9.3.2	LVC 融合 .....	259
9.4	作战仿真建模技术 .....	262
9.4.1	复杂系统建模 .....	263
9.4.2	智能系统建模 .....	264
	参考文献 .....	266



## 绪 论

仿真科学与技术是以建模与仿真实论为基础,以计算机系统、物理效应设备及仿真器为工具,根据研究目标,建立并运行模型,对研究对象进行认识与改造的一门综合性、交叉性学科。利用仿真技术,建立作战仿真系统,通过作战仿真为指挥人员提供辅助决策支持,在信息化战争中,作战仿真将成为我军作战研究最重要的手段之一。

信息化战争是武器系统成体系的对抗,为了进一步描述作战系统的复杂性,仿真粒度进一步细化,促使作战仿真系统的规模进一步扩大,仿真处理时间剧增,造成仿真周期变长,不能满足指挥人员对作战仿真的实时性需求。

随着仿真应用的不断深入,仿真规模越来越大,仿真模型越来越精细,其对计算资源的要求也越来越高。基于高性能计算的作战并行仿真是满足日益增长仿真需求的重要途径,正成为继理论研究和试验研究之后的第三种认识和改造作战系统的重要手段。首先,作战并行仿真是进行作战仿真研究、解决作战系统复杂问题的重要途径,针对仿真应用特点,采用高性能计算机体系结构和硬件加速器,是作战仿真的发展趋势。其次,为充分利用高性能仿真计算机的资源,更好地支持大规模或超大规模并行仿真,并行仿真支撑软件会进一步攻克同步算法、负载均衡、乐观机制、高效通信等关键技术,以取得更好的加速比和可扩展性。最后,随着并行仿真应用领域的不断拓展,并行仿真必将在国防安全、生命科学、社会学等领域得到越来越广泛的应用,应用的牵引会进一步促进并行仿真技术的快速发展。